

Выводы

1. Процесс карбидизации повышает сопротивление износу инструментальных сталей для горячего и холодного деформирования.
2. Правильный выбор параметров процесса карбидизации сталей позволяет уменьшить их износ на 10–20 %.
3. Правильный выбор марки стали в сочетании с методом обработки оказывает существенное влияние на повышение износостойкости. В среднем повышение износостойкости может достигать 40 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Structure and properties of nitrokarburized diffusion layers on High-Speed steels / T. Babul [et al.] // *Jornal of Materials Engineering and Perfomance*. – 2003. – Vol. 12, No. 6. – P. 696–700.
2. Кухарева, Н. Г. Механические свойства инструментальных сталей с диффузионными карбидными и карбонитридными покрытиями / Н. Г. Кухарева, С. Н. Петрович, Н. А. Галынская // *Вестник БНТУ*. – 2007. – № 5. – С. 15–20.

УДК 546.77.281

В. А. ВЕЙНИК, Э. Д. ЩЕРБАКОВ, канд. техн. наук (БНТУ)

ПОВЫШЕНИЕ ЖАРОСТОЙКОСТИ И ТЕРМОСТОЙКОСТИ УГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В настоящее время в машиностроении используется много деталей, работающих при высоких температурах в условиях газовой коррозии и при термоциклических нагрузках: лопатки газовых турбин, газовые горелки, детали печных конвейеров, крепеж, поддоны, теплообменники и т. д. Эти детали требуют использования дорогих высоколегированных сталей для обеспечения комплекса необходимых эксплуатационных характеристик. Создание на поверхности детали диффузионных защитных покрытий позволяет заменить дорогостоящие легированные стали на более дешевые, а также увеличить срок службы детали.

Целью работы являлось повышение жаростойкости, термостойкости, термостабильности, увеличение толщины покрытий и повышение их пластичности.

Для конструкционного сплава, предназначенного для работы в условиях высокотемпературной газовой коррозии, необходимо соблюдение как специфических требований к структуре, так и увеличение стабильности поверхности, т. е. одновременно решаются три вопроса: условия применения, выбор сплава, выбор защиты. Покрытие для каждого сплава должно быть не только защитным, но дешевым и надежным. При этом защитные свойства, достигнутые на экспериментальных образцах, должны быть реализованы на каждой детали. Надежность покрытия заключается в хорошем сопротивлении износу, т. е. оно не должно разрушаться при небольших повреждениях. Для того чтобы быть действительно защитным для данного основного материала, покрытие должно удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) образовывать тонкую, плотно прилегающую оксидную пленку, свободную от таких дефектов, как трещины, пузыри и т. д., иметь минимальный коэффициент переноса массы в пленке (оксиды не должны отслаиваться, испаряться, подвергаться фазовым превращениям или разрушаться в результате реакции с отложениями солей);

- 2) оставаться металлически связанным с основой; в процессе изготовления и работы должны отсутствовать несплошности и поры как в слое покрытия, так и на поверхности основного материала;

- 3) быть диффузионно-инертным по отношению к сплаву-основе, чтобы в процессе эксплуатации детали не изменялся заданный состав системы «покрытие – сплав»;

- 4) не оказывать неблагоприятного влияния на механические свойства основного сплава;

- 5) иметь сходные характеристики по теплопередаче и термическому расширению с основным металлом;

- 6) быть жаростойким, обладать хорошей термической выносливостью, сопротивлением эрозии и другими воздействиями;

- 7) быть пластичным при всех температурах или иметь границу перехода «хрупкость – пластичность» при температурах более низких, чем рабочие;

- 8) не способствовать образованию жидкой фазы на поверхности основного сплава в процессе выдержки при высоких температурах;

9) быть тонким, однородным, легко наносимым или заменяемым при необходимости.

Следует отметить, что ни одна из внедренных систем «покрытие – основа» полностью не удовлетворяет указанным требованиям.

Для повышения жаростойкости чаще всего используются следующие процессы однокомпонентного диффузионного насыщения: алитирование, хромирование, силицирование.

Типичным примером широко применяемого термодиффузионного покрытия является класс алюминидных покрытий [1]. Этот метод повышения сопротивления жаропрочных сталей и сплавов окислению включает осаждение алюминия из внешних источников и диффузию его в основной металл с образованием в поверхностном слое интерметаллических соединений алюминия типа FeAl . Алюминидная фаза в противоположность алюминию имеет высокую температуру плавления. Более того, она очень медленно окисляется, образуя защитный оксид Al_2O_3 . В процессе выдержки в случае частичного отслаивания оксида соединения алюминия на вновь образовавшейся поверхности повторно окисляется до Al_2O_3 . Это качество «самозалечивания» алюминидного покрытия замедляет действие окисления на металл основы. У сплавов без покрытия отслаивание окалины вызывает обеднение алюминием. При отсутствии процессов самозалечивания это приводит к быстрому местному окислению.

Несмотря на большое количество исследований, сведения о которых приведены в литературе [1, 2], данные о механизме формирования алитированных слоев на сталях, их структуре и жаростойкости после насыщения при различных условиях противоречивы и нуждаются в уточнении. Применение алитированных слоев ограничивается образованием на поверхности изделий хрупкой зоны алюминидов, которая скалывается при взаимодействии механических нагрузок и термических ударов. Ниже приведены результаты исследования возможности получения на сталях алитированных слоев, обладающих наряду с высокой жаростойкостью стойкостью против воздействия термических ударов.

Образцы технического железа и стали 45, 20X13, 08X18H10T и 12X23H18 алитировали в порошковых смесях из алюминия АПС-1 и оксида алюминия марки х. ч. в контейнерах с плавким затвором [3]. В качестве активаторов использовали фтористый алюминий и хлористый аммоний.

Увеличение содержания алюминия в смеси приводило к значительному росту толщины слоев (табл. 1).

Таблица 1. Толщина алитированных слоев на сталях в зависимости от содержания алюминия в смеси из АПС-1, Al_2O_3 и 2 % AlF_3 полученных при 1000 °С за 5 ч, мкм

Содержание алюминия в смеси, %	Марка стали			
	45	20Х13	08Х18Н10Т	12Х23Н18
0	210	220	180	150
10	410	430	250	200
20	650	570	310	250
30	860	670	380	310
40	1100	740	440	350
50	1300	800	500	400

При содержании алюминия в смеси более 20 % алитированные слои имели низкое качество поверхности, трещины, сколы. Поэтому в дальнейших исследованиях более подробно изучали насыщение в смесях с содержанием алюминия до 20 %.

Диффузионные слои на железе и сталях, полученные при 900-1100 °С, состояли из двух основных зон: поверхностной зоны алюминидов и зоны столбчатых кристаллов α -твердого раствора с концентрацией алюминия на границе раздела с зоной алюминидов приблизительно 35 %. В зоне столбчатых кристаллов α -твердого раствора при охлаждении от температуры алитирования происходит упорядочение с образованием сверхструктур Fe_3Al и FeAl .

Рассмотрим влияние содержания алюминия в смеси на толщину зон алюминидов и α -твердого раствора на стали 08Х18Н10Т. При послойном рентгеноструктурном анализе диффузионного слоя, полученного в смеси, содержащей 20 % алюминия, установлено наличие в поверхностной зоне алюминидов Fe_2Al_3 , вероятно, легированного хромом и никелем. Под алюминидным слоем располагался слой α -твердого раствора столбчатого строения с выделением алюминидов. Повышение температуры алитирования и содержания алюминия в смеси приводило к увеличению общей толщины слоя.

особенно толщины зоны алюминидов. После насыщения в смесях с 15 и 20 % алюминия при 900 °С на острых кромках образцов наблюдались мелкие трещины и сколы. С повышением температуры насыщения до 1100 °С качество поверхности образцов ухудшалось, заметно увеличивались размеры трещин, появлялись сколы. При содержании алюминия в смеси 5–10 % алитированные образцы имели поверхность хорошего качества, без сколов и трещин.

На техническом железе и стали 45 алитирование в смесях с 15 и 20 % алюминия при температуре 1100 °С приводит к формированию на поверхности образцов структурной зоны алюминидов, по внешнему виду напоминающей пластинчатый перлит. При тех же условиях насыщения на легированных сталях в поверхностной зоне алюминидов наблюдались участки со структурой, напоминающей зернистой перлит, на острых кромках – участки эвтектоида с пластинчатой структурой.

Рассмотрим результаты испытаний на жаростойкость образцов стали 08X18H10T после алитирования в смесях с 5–10 % алюминия при температурах насыщения 800, 900, 1000 и 1100 °С в течение 5 ч. Испытания проводили по схеме: нагрев до 1000 °С – 2–2,5 ч, выдержка при 1000 °С – 5 ч, охлаждение до 200–300 °С вместе с печью – 15 ч, а затем на воздухе. После каждого цикла испытаний определяли относительное изменение массы (г/м^2). Длительность испытаний составляла 20 циклов, суммарная выдержка при 1000 °С – 100 ч.

На поверхности образцов без покрытий, взятых для сравнения, уже после первого цикла испытаний на жаростойкость образовывался толстый слой окалины, появлялись трещины, изменялась форма образцов.

Слои, полученные в смеси с 5 % алюминия при 800 и 900 °С, имели практически одинаковое увеличение массы за 100 ч испытаний, полученные при 1000 °С – несколько меньшее, при 1100 °С – несколько большее. Однако скорости окисления слоев, полученных при различных температурах в смеси с 5 % алюминия, после двух-четырех циклов испытаний становились практически одинаковыми.

В смеси с 10 % алюминия при 800, 900 и 1000 °С получены слои, уровень жаростойкости которых одного порядка с таковым слоев, полученных в смеси с 5 % алюминия. Повышение температуры алитирования до 1100 °С привело к уменьшению удельного изменения массы образцов за 100 ч испытаний до 35 г/м^2 .

Аналогичные зависимости по жаростойкости получены также для технического железа и сталей 45 и 20Х13.

Циклические испытания на жаростойкость в сочетании с резкими термическими ударами проводили по следующему режиму: нагрев до 1000 °С за 5 мин, выдержка при 1000 °С – 5 ч, охлаждение в воде. Увеличение массы образцов, которое наблюдается для некоторых режимов насыщения, объясняется образованием на поверхности покрытий плотных, нескалывающихся окисных пленок, надежно защищающих сталь от окисления. Уменьшение массы образцов при таких испытаниях связано с отслаиванием образовавшейся при 1000 °С окалины и хрупкой зоны алюминидов покрытия. Наилучшими защитными свойствами при таких испытаниях обладают слои, полученные в результате насыщения в смеси с 5 % алюминия при 1100 °С, имеющие структуру α -твердого раствора зоны FeAl на поверхности и концентрацию алюминия около 35 %. Алитирование в смеси с 10 % алюминия приводит к образованию на поверхности зоны алюминидов Fe₂Al₃ (обладает повышенной хрупкостью). Эта зона скалывалась при испытаниях.

Для устранения хрупкой зоны алюминида Fe₂Al₃ проводили отжиг алитированных слоев, полученных при 1000 °С в смеси с 10 % алюминия, при 1100 °С в течение 5 ч, который привел к увеличению общей толщины слоя, уменьшению концентрации алюминия на поверхности, обеспечил получение плотной защитной окисной пленки, практически не скалывающейся при испытании.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать условия алитирования, позволяющие получить слои, пригодные для работы в условиях высокотемпературной газовой коррозии и термических ударов: 1) алитирование в смеси с 5 % алюминия при 1100 °С – 5 ч; 2) алитирование в смеси с 10 % алюминия при 1000 °С – 5 ч, отжиг при 1100 °С – 5 ч.

Однако эти покрытия не всегда обеспечивают достаточную защиту от высокотемпературной газовой коррозии, а также могут быть недостаточно надежными при циклических изменениях температуры эксплуатации. Таким образом, алитированные слои на сталях имеют высокую хрупкость, недостаточно высокую жаро- и термостойкость, что отрицательно сказывается на ресурсе работы деталей.

Для обеспечения комплекса необходимых эксплуатационных характеристик в алюминидные покрытия часто вводят некоторые легирующие элементы. Чаще всего добавляют хром для повышения жаростойкости. Для защиты от высокотемпературного циклического окисления могут быть рекомендованы [2] также покрытия на основе Al–Cr, Al–Cr–Si.

Структура хромоалитированных и хромоалюмосилицированных слоев на стали 08X18H10T близка к структуре алитированных покрытий. Покрытия сохраняют свои защитные свойства через 100 ч испытаний при 1000 °С (20 циклов охлаждения в воде). Сколов с поверхности не наблюдается благодаря высокой пластичности покрытий. Во время испытаний происходит диффузия элементов покрытия в основу: растет зона твердого α -раствора, пополняемая слоем алюминидов. Так, за 50 ч испытаний толщина хромоалитированного слоя увеличивается от 320 до 750 мкм. Разработанное покрытие, кроме жаростойких свойств, имеет высокое сопротивление термической усталости.

Иногда вводят частицы инертных оксидов с целью свести к минимуму проблему отслаивания. Дефекты покрытия, такие как точечное разьединение, пузыри и трещины, часто устраняют посредством комплексного легирования. Существует большое количество промышленных защитных покрытий. Несмотря на большой ассортимент покрытий, сведения о них ограничены, так как являются собственной информацией фирм.

Легирующие элементы могут только улучшать некоторые специфические свойства основных алюминиевых покрытий, но полностью подавлять процессы взаимодействия покрытия и металлоосновы они не способны, так как система в процессе длительной работы, как правило, претерпевает изменения. Поэтому целесообразно оперировать понятием «диффузионный барьер» (слой, лежащий между покрытием и сплавом, который замедляет взаимную диффузию основных элементов системы). В работах [4–8] считается, что введение хрома, кремния, иттрия, тантала, молибдена в алюминиевые покрытия способно замедлить диффузионные процессы. Однако это предположение требует детального изучения.

Процессы образования и работы термодиффузионных покрытий в сильной степени зависят от стабильности и массопереноса

большинства интерметаллидных фаз. Выбор легирующих элементов осуществлялся на основе литературных данных по объемному и поверхностному легированию, а также по результатам патентного поиска. Анализ патентной информации позволяет расположить легирующие элементы в ряд по частоте их использования: Al, Cr, Si, V, PЗМ(Y), В, Мо, Са. Наиболее исследованными процессами являются хромоалитирование и хромоалюмосилицирование. В работе исследовано сначала двухкомпонентное, а затем трех- и четырехкомпонентное насыщения.

Процесс диффузионного хромовольфрамоалитирования стали 08Х18Н10Т проводили при температурах 1100 °С в течение 5 ч в контейнерах с плавким затвором без использования вакуума или защитных атмосфер. Данные по жаростойкости и толщине комплексных диффузионных слоев приведены в табл. 2. Жаростойкость (статические испытания) оценивали по величине изменения массы образцов при температуре испытаний 1100 °С в течение 100 ч.

Таблица 2. Режимы ХТО и жаростойкости Al–Cr–W покрытий на стали 08Х18Н10Т

Состав насыщающей смеси, мас. %						Жаростойкость при $t = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 100 ч	Толщина диф. слоя, мкм	Микротвердость диф. слоя, МПа
Al ₂ O ₃	Cr	Al	W	MgO	NH ₄ Cl	Увелич. массы, г/м ²		
75	12,5	11,5	–	–	1,0	61	560	6200
57,5	18,5	4,5	18,5	–	1,0	67	350	6300
58,5	16,5	5,5	16,5	1	2,0	43	420	4600
61,0	14,5	6,5	14,5	2	1,5	45	670	4800
63,5	12,5	7,5	12,5	3	1,0	45	740	5400
65,5	10,5	8,5	10,5	4	1,0	63	700	6800

Дополнительное введение вольфрама в насыщающую смесь позволяет повысить устойчивость алюминия диффузионного слоя, что снижает на 40 % рассасывание алюминия в поверхностном слое при длительном воздействии высоких температур и также ведет к образованию на поверхности сплава тонкой, но прочной пленки типа $Al_2O_3-Cr_2O_3-WO_3$, увеличивая жаростойкость Al-Cr-W диффузионных слоев. В то же время присутствие вольфрама в составе смеси повышает пластичность слоя, что в первую очередь сказывается на снижении твердости и повышении пластичности покрытия и отсутствии в нем пор и трещин, что очень важно для повышения жаростойкости.

Диффузионное танталомолибденоалитирование хромоникелевой стали 08X18N10T в предлагаемой порошковой среде осуществляли в контейнере с плавким затвором при 1100 °С в течение 4 ч (табл. 3).

Таблица 3. Жаростойкость Al-Ta-Mo покрытий

Но- мер со- става	Состав насыщающей смеси, масс. %					Жаростой- кость при $t =$ = 1000 °С, 100 ч Увели- чение массы, г/м ²	Тол- щина слоя, мкм	Состоя- ние поверх- ности
	Al	Ta	Al ₂ O ₃	Mo	NH ₄ Cl			
Известный состав								
1	30	70	—	—	—	26	50	Неудов- летвори- тельное
Предлагаемый состав								
2	2,5	20,5	55,5	20,5	1,0	27	310	Хоро- шее
3	5	16,5	61	16,5	1,0	18	340	Хоро- шее
4	7,5	12,5	66	12,5	1,5	16	800	Хоро- шее
5	10	8,5	71	8,5	2,0	19	680	Хоро- шее
6	12,5	4,5	77,5	4,5	1,0	29	570	Удовл., сколы

Авторами получены данные по толщине и жаростойкости диффузионных танталомолибденоалюминиевых слоев на стали 08X18H10T, а также по состоянию поверхности обрабатываемых образцов. Жаростойкость (статические испытания) оценивали по величине увеличения массы образцов при температуре испытаний 1100 °С за 100 ч при охлаждении вместе с печью. Результаты испытаний на жаростойкость Al-Ta-Mo покрытий представлены в табл. 3.

Таким образом, использование предлагаемого состава позволяет по сравнению с известным повысить жаростойкость жаропрочных сплавов в 1,4–1,6 раза, увеличить толщину диффузионных слоев и улучшить качество поверхности обрабатываемых деталей.

В работе также исследовано влияние легирующих элементов на структуру, фазовый состав, микротвердость, жаро- и термостойкость алитированных слоев на стали 08X18H10T. Наиболее целесообразно получение на поверхности фазы FeAl, легированной вводимыми элементами.

В табл. 4 приведены результаты испытаний на жаро- и термостойкость многокомпонентных диффузных покрытий. При испытаниях на жаростойкость охлаждение образцов осуществлялось вместе с печью. При испытаниях на термостойкость образцы охлаждались в воде с температуры испытаний. Общая толщина диффузионного слоя включает в себя толщину зоны алюминидов и толщину зоны α -твердого раствора.

Таблица 4. Сравнительная жаростойкость диффузионных покрытий на стали 08X18H10T

Насыщающие элементы	Толщина зоны алюминидов, мкм	Жаростойкость при $t = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 100 ч Увеличение массы, г/м ²	Термостойкость при $t = 20\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 75 ч (15 циклов). Изменение массы, г/м ²
1	2	3	4
Al	230	65	–310
Al-Cr	240	63	24
Al-Ta*	210	19	10
Al-W	100	50	–

1	2	3	4
Al-Mn	150	>100	>-10
Al-Mo	130	35	-
Al-HfC	270	75	-
Al-Cr-Y	280	57	5
Al-Cr-Ta*	140	16	10
Al-Cr-Zn	250	>100	>-10
Al-Cr-Mg	100	24	10
Al-Cr-Ti	250	>100	>-10
Al-Cr-W	150	45	-
Al-Cr-Mn	200	>100	>-10
Al-Ta-Mn	150	>100	>-10
Al-Cr-HfSi ₂	240	70	-
Al-Cr-Si-Y	160	56	-
Al-Cr-Ta-Y	350	46	-
Необработанная сталь	-	2800	>-1000
X18H10T			

*Значение жаростойкости за 100 ч при 1000 °С.

Максимальной жаро- и термостойкостью обладают комплексные Al-Ta, Al-Ta-Mo, Al-Cr-Y, Al-Cr-W, Al-Cr-Ta, Al-Cr-W и Al-Cr-Y-Ta покрытия.

Легирование алюминидных покрытий позволяет повысить их жаростойкость в 1,1–1,9 раза, а термостойкость – в 2–10 раз. Разработанные покрытия могут быть рекомендованы для защиты деталей технологической оснастки в печном оборудовании, оборудовании газовых горелок, лопаток, газовых турбин и других деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябов, В. Р. Алитирование стали / В. Р. Рябов. – М.: Металлургия, 1973. – 240 с.
2. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справ. / Г. В. Борисенко [и др.]. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
3. Защитные покрытия на металлах / Л. С. Ляхович [и др.]. – Киев, Наук. дум., 1986. – С. 71–74.
4. Химушкин, Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы / Ф. Ф. Химушкин. – М.: Металлургия, 1969. – 752 с.

5. Улянин, Е. А. Коррозионностойкие стали и сплавы: справ. / Е. А. Улянин. – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.
6. Масленков, С. Б. Жаропрочные стали и сплавы / С. Б. Масленков. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с.
7. Жаропрочные сплавы / Ч. Симс, В. Хагелъ; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1976. – 568 с.
8. Коломыцев, П. Т. Жаростойкие диффузионные покрытия / П. Т. Коломыцев. – М.: Металлургия, 1979. – 272 с.

УДК 621.791.92

В. М. КОНСТАНТИНОВ, канд. техн. наук,
А. В. СТЕФАНОВИЧ (БНТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ С ЗАДАННОЙ СТРУКТУРОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХТО

Среди промышленных способов упрочняющей обработки быстроизнашивающихся деталей машин и инструментов (термическая и химико-термическая обработка, наплавка, напыление, лучевые способы упрочнения) процесс наплавки занимает ведущее место вследствие своей универсальности и возможности получения упрочненных слоев в широком диапазоне толщин (0,2–10 мм и более) с различным комплексом свойств.

Покрyтия методом наплавки можно применять для повышения стойкости деталей, работающих не только при обычной температуре, но и при повышенной, а также в агрессивной среде и при сочетании температуры и агрессивной среды.

Условия, в которых происходит износ деталей машин, очень разнообразны. В общем объеме всех видов износа примерно 80–90 % приходится на долю абразивного или абразивно-ударного износа.

В разновидностях абразивного изнашивания общим является механизм процесса, который заключается во внедрении абразивного тела в металл и его продвижении при трении вдоль поверхности, вследствие чего приходит пластическое деформирование металла